

# 基于 GPU 的图形电磁计算加速算法

杨正龙<sup>1</sup>, 金 林<sup>1</sup>, 李蔚清<sup>2</sup>

(1. 南京电子技术研究所, 江苏省南京市 210013; 2. 南京理工大学计算机科学与技术学院, 江苏省南京市 210094)

**摘 要:** 本文利用现代图形加速卡中 GPU (Graphics Process Unit) 的可编程管线, 实现了图形电磁计算 (GRECO) 方法. 与原有的方法相比, 在利用物理光学和物理绕射理论的基础上, 计算速度提高了 20 倍左右. 并且利用 GPU 实现了射线追踪算法, 用于目标上多次散射的计算, 使得 GRECO 方法可以快速计算具有凹腔结构目标的电磁散射. 本方法对于目标识别和逆合成孔径成像等方面的研究具有重要的应用价值.

**关键词:** 电磁散射; 图形电磁计算; 图形处理单元 (GPU)

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1056-05

## Accelerated GRECO Based on GPU

YANG Zheng-long<sup>1</sup>, JIN Lin<sup>1</sup>, LI Wei-qing<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China;

2. Computer Science and Technology Institute of Nanjing University of Science and Technical, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** For obtaining the electromagnetic scattering characteristic of a complex target efficiently, GRECO (Graphical Electromagnetic COmputing) is implemented by a programmable pipeline of a modern GPU (Graphics Processing Unit). The speed of the simulation can be improved up to 20 times compared with the raw GRECO. The ray tracing algorithm based on a GPU is implemented to obtain the multiple reflection contribution of a target with concave structure. This approach will redound to research works such as radar target identification and inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging.

**Key words:** electromagnetic scattering; graphical electromagnetic computing; graphics process unit (GPU)

## 1 引言

图形电磁计算方法 (GRECO) 是 J. M. Rius 提出的一种计算电大尺寸目标电磁散射特性的有效方法<sup>[1]</sup>. 它基于物理光学和物理绕射理论, 巧妙地利用了计算机图形学中的光照模型和计算机图形卡的硬件加速功能, 实现了目标电磁散射特性的高效计算, 可以为雷达目标识别, 雷达成像等方面的研究提供有效的仿真数据. 由于这种方法利用了计算机图形加速卡的强大运算功能, 仿真速度非常快. 本文在深入研究了目前的计算机图形处理方法的基础上, 利用图形处理器的可编程管线来进一步加快仿真速度, 获得了满意的效果. 在利用物理光学和物理绕射理论计算目标散射特性的过程中, 速度比原有的 GRECO 提高了 20 多倍.

近年来, 伴随着图形处理器 (GPU) 性能的大幅度提高以及可编程特性的发展, 人们首先开始将图形流水线的某些处理阶段以及某些图形算法从 CPU 向 GPU 转移. 除了计算机图形学本身的应用, 还涉及到其它领域的计算, 使得基于 GPU 的通用计算在近两三年来成为研究热点<sup>[2]</sup>. 在电磁学领域, 已有研究人员将 FDID 算法利用 GPU 进行了加速<sup>[3]</sup>.

CPU 在处理计算密集型的应用中, 运算速度往往无法满足用户的需求, 虽然可以利用其它类型的芯片或者

处理系统, 如高速的 DSP 或者高性能集群, 但这些专用的 DSP 系统一般非常昂贵, 限制了其应用范围. 与传统的 CPU 相比, 在 GPU 内部, 一般具有多个顶点处理管线和像素处理管线, GPU 的顶点着色器流水线使用多指令多数据流 (MIMD) 方式控制, 像素着色器流水线使用单指令多数据流 (SIMD) 方式, 本质上相当于一个并行向量机, 使得 GPU 具有更高的数据处理速度和并行运算能力, 对于计算密集型应用有非常高的效率. 并且 GPU 核心的工作频率比传统的 CPU 更快, 这样就使得 GPU 比单个 CPU 的处理能力强大许多.

GRECO 巧妙的利用了图形硬件的功能, 使得复杂的遮挡运算由计算机图形卡来完成, 实际上, 深入了解 GRECO 的原理之后, 我们发现完全可以利用图形卡 GPU 的可编程管线实现 GRECO 中计算最密集的部分, 并且无需启动光照渲染流程, 只需编写新的顶点/像素绘制程序 (Vertex/Fragment Shader), 并替换原来固定管线的功能, 就可以实现复杂目标电磁散射的计算. 现代的图形卡中一般具有多条并行的顶点/像素处理管线, 而 GRECO 中大量的计算是在像素空间中进行的, 因此利用并行的像素处理管线可以大大提高 GRECO 的计算效率. 本文利用图形卡 GPU 的可编程管线, 结合以前的研究基础<sup>[4~6]</sup>, 实现了复杂目标的单、双站计算, 并充分考虑了目标不同部分之间的多次散射, 在计算结果准确

的基础上,计算效率得到了大幅度的提升,尤其在利用物理光学和物理绕射理论计算的时候,获得了约 20 倍的性能提升.本文所提及的物理光学等电磁散射计算方面的内容,可参考文献[1,7,8],这些文献中详细的描述了 GRECO 的实现原理,此处不再赘述.

## 2 基本原理

GRECO 中,进行目标电磁仿真的步骤为:

- (1) 读取目标三维模型文件;
- (2) 计算机图形渲染;
- (3) 利用深度缓存获得表面上各点的深度信息;
- (4) 利用不同的光照获得目标上各点的法矢;
- (5) 将深度信息正确地映射到目标深度;
- (6) 利用 PO/PTD 近似计算各像素点的散射场;
- (7) 将各点的散射场相干叠加获得总散射场.

在上述步骤中,目标间的遮挡通过 GPU 的硬件加速实现,而计算机 CPU 承担了目标表面法矢的计算,像素对应的各个散射单元的散射计算和最终的相干叠加功能.在这一过程中,需要计算机的主存和显卡的显存之间进行 3 次大容量的内存交换,即两种光照情况下的颜色读取和深度信息的读取,在 CPU 计算表面法矢和各个像素单元的散射过程中,需要大量的浮点乘法运算.而利用 GPU 的可编程管线,上述步骤可以直接在 GPU 中快速完成<sup>[9]</sup>,在最终的相干叠加过程中,可以利用 GPU 的约减(Reduction)运算方法并行地进行叠加运算<sup>[10]</sup>,这样,主存和显卡的显存之间只需进行很少的内存交换.因此从总体上节约大量的运算时间.下面将详细介绍整个仿真流程.

### 2.1 利用着色器的散射运算

在计算目标电磁散射过程中,GRECO 利用了光栅图形学中图形的扫描转换自然地将目标表面进行了离散,同时利用显卡的自动消隐功能完成了遮挡面的剔除,这样就节约了大量的求交运算时间.相比于传统的高频方法或者数值方法,GRECO 已经将计算效率已经达到了当时的最高水平.随着计算机图形硬件的发展,尤其是可编程管线的出现,这种算法可以完全在 GPU 当中进行,利用 GPU 的可编程特性,可以快速的计算出复杂目标的电磁散射.

为了利用 GPU 进行电磁散射的计算,首先要了解 GPU 的工作流程.通常在三维图形的应用中,GPU 的处理流程如图 1 所示:

图 1 表示固定管线情况下 GPU 的处理过程,随着 GPU 可编程特性的发展,其中部分固定管线的功能可以由用户编写的特定绘制功能所代替,即虚线箭头所指的部分可以利用可编程的顶点处理器和片断处理器来代替.根据 GRECO 的计算过程,我们可以利用 Vertex Shader

完成不同姿态下三维目标的几何变换和面元的法向变换.而处理过程中的光栅化和插值处理恰好使得目标表面的法矢自动离散化到 Fragment Shader 单元中,因此,在编写绘制程序中,我们就不需要利用 GRECO 中的光照来获得目标表面离散化的法矢.同样,目标表面散射单元的位置信息也可以直接由光栅化过程从 Vertex Shader 中随 GPU 处理管线到达 Fragment Shader<sup>[9]</sup>,在远场计算条件下,RCS 的计算只需要知道目标表面散射单元的法矢和深度信息即可.在 Fragment Shader 中,我们直接使用了 J. M. Rius 在论文中给出的计算像素对应表面单元的散射计算公式<sup>[1]</sup>,此处不在赘述.

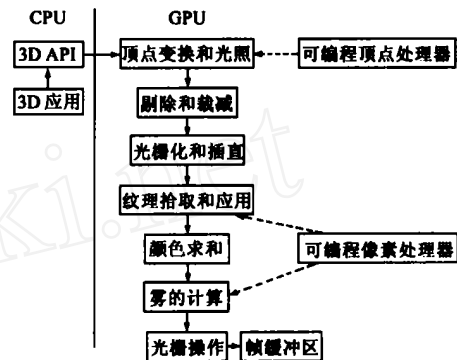


图 1 GPU 处理流程

获得了目标表面各个像素对应的散射单元的散射分量之后,利用绘制到纹理(RendertoTexture)技术,我们把各个像素单元散射的实部写入纹理颜色的 R 分量,将虚部写入 G 分量.然后利用下面的约减运算得到相干叠加的结果.

### 2.2 约减运算

由上述计算过程得到的电磁散射结果存储在当前纹理的 RGB 分量中,目标在某种姿态下的电磁散射是整个表面散射单元散射贡献的相干叠加,因此需要将纹理中所有 R 分量和 G 分量分别叠加起来,得到特定姿态下目标的总散射强度.通常我们可以利用 OpenGL 中的接口函数将纹理中的颜色值回读到计算机主存中,将单元的贡献叠加起来,但这样需要在内存和显存之间大量交换数据,另外,回读之后,需要利用 CPU 将所有单元散射逐个叠加起来,这个过程一般比较耗时.

在深入研究了 GPU 的处理流程后,我们发现利用并行约减(Reduction)过程可以大大加速相干叠加的过程,利用

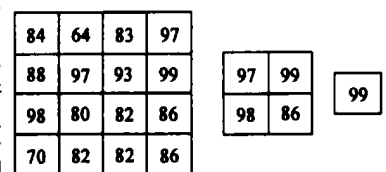


图 2 以多遍执行最大值约减

GPU 中多个纹理的操作,最后直接将叠加的结果回读到计算机主存中.

在 GPU 的应用中,约减算法主要用于求取纹理中

的最大值,求和等操作.这类操作的约减过程如图 2 所示<sup>[10]</sup>:

在约减的实现过程中,每次总是对一个  $2 \times 2$  的子区间实行相应的操作,如求最大值或者求和,然后形成一个大小为原来数组四分之一的新数组,并迭代至最

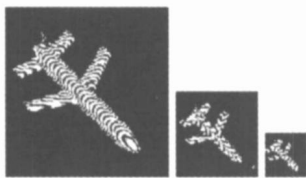


图 3 RCS 相干叠加的约减过程

后的结果.这就要求数组的维数必须是 2 的整数次幂.我们参考了 Jinwook Kim<sup>[11]</sup>提供的约减算法实例,图 3 是我们计算某巡航导弹模型的约减过程.

### 2.3 边缘绕射的计算

在文献[1]中,采用了基本边缘波 (EEW) 的方法获得目标棱边上的边缘绕射波.这种方法需要正确地获得模型的几何参数及其与雷达照射波之间的几何关系.文献[1]中采用的方法无法完备地获得这些信息,因此在文献[5,12]中利用模型本身的信息完备地获得了目标棱边的信息.结合文献[5,12],我们实现了利用 GPU 进行棱边绕射场的计算.其中的关键技术就是如何在遮挡的情况下,正确获得目标的棱边信息.并将棱边的各个几何参数映射到 GPU 的片断着色器中,以便利用物理绕射理论 (PID) 或者增量长度绕射系数 (ILDC) 进行绕射场的计算.

对于利用表面建模方法生成的三维三角形面片模型,相邻的三角面片之间存在公共边,如果两个相邻三角面片的法矢之间的夹角大于某个预先设定的阈值,就可以认为其公共边是棱边,否则认为两个三角面元是位于光滑曲面上的.计算机图形学中的法线均衡技术与此非常类似<sup>[9]</sup>.通过对三维数据模型进行预处理,可以根据面元法矢夹角的阈值得到相应的棱边几何信息,包括两个面的法矢,棱边的边缘方向和内劈角.这些参数不是独立的,可以由两个法矢获得棱边的边缘方向和内劈角.因此,只需存储一个面元的法矢,边缘的方向和内劈角就可以满足棱边绕射计算的需要.文献[12]利用 3 个棱边模型的显示列表存储了棱边的几何信息,一个包含了棱边的法矢,一个包含了边缘的方向,另一个包含了内劈角的信息,然后沿用 GRECO 的像素处理方法进行棱边绕射场的计算.在棱边模型的消隐过程中,为了只显示没有被遮挡的棱边,首先禁用光照,绘制一个颜色值为 0,即全黑的模型,然后绘制相应的棱边,这样,可以利用全黑模型的深度信息对棱边进行正确的消隐.本文在这种方法的启发下,利用 GPU 的可编程特性,只利用了一个显示列表,就完整地进行了棱边所需的消隐过程和棱边信息的保存,并在片断着色器中,完整地实现了绕射场的计算,使得绕射场的计算效率获得了很大的提高.

在 OpenGL 中,可以赋予每个顶点一个主颜色和一个辅助颜色,每个颜色具有 RGBA 四个分量,我们在棱边的绘制过程中,利用主颜色的 RGB 三个分量保存棱边的法矢,而利用 A 分量存储内劈角,利用辅助颜色的 RGB 分量存储边缘的方向信息,棱边的消隐也采用了全黑模型的方法.图



图 4 棱边的显示

4 为一个经过消隐的目标棱边模型,可以看到,机身和机翼的光滑曲面部分与背景一样是全黑的,机翼的边缘都正确的显示出来,并且颜色信息中包含了棱边的几何信息.

这样,棱边绕射计算所需要的信息都可以正确地进入 GPU 的片断着色器,然后利用着色器的并行计算能力快速的获得棱边绕射场.然后利用同样的约减过程获得绕射场的总贡献.

### 2.4 多次散射计算

在复杂目标电磁散射的计算中,一个重要的问题就是计算目标不同表面间的多次反射,这方面的经典算法就是弹跳射线法 (SBR, Shooting and Bouncing Ray Technique)<sup>[13,14]</sup>,相应的代表软件就是 Xpatch<sup>[15]</sup>.由于雷达波束的传播和光线在空气中的传播具有一定的相似性,所以射线跟踪算法可以应用于高频电磁散射特性的研究.基于射线追踪算法,记录下所有射线在目标表面上的入射、反射过程中的光线传播路径,可以正确地反映出多次散射过程中的相位关系,最终在接收方向将多次散射的贡献相干叠加,获得复杂目标,尤其是具有腔体结构目标的散射特性.

经典光线跟踪算法是关于可见光光强的一种光照模型求解算法,考虑到高频电磁波在传播特性上与可见光有相似之处,可以借鉴经典光线跟踪算法进行电磁散射特性计算.考虑波的相干性后,需对经典光照模型修正得到的基于物理光学理论的光照模型,因此在采用光线跟踪算法进行 RCS 计算时,要对经典算法进行改写,主要包括:

(1) 可见光跟踪算法的最终目的是求解象素颜色 (光强),而电磁散射计算的目的是求解总散射场;

(2) 可见光跟踪算法的每一步光强的求解是通过对面交点代入 Phong 光照模型计算得到的,而电磁散射计算则需要对表面的每一个多边形面元带入物理光学表达式;

(3) 可见光跟踪算法要考虑折射的情况,而对于金属材料,其电磁散射过程中没有折射分量。

电磁散射计算中需要解决当电磁波入射到目标上时,获得其多次散射的传播路径,给出射线追踪的面元访问顺序,生成相应的树型结构和子面元的数据结构。经典光线跟踪算法中需要进行大量的求交测试,非常消耗计算能力。为了在利用光线跟踪算法实现较高的计算精度的同时,保证算法的高效性,我们研究了基于 GPU 的快速算法。

在光线跟踪的硬件加速算法方面,Purcell 等将所有三角形的顶点组织到三幅纹理中<sup>[16]</sup>,并建立一个三角形链表纹理,这样可将整个光线跟踪的算法放到 GPU 上来执行。我们在 Purcell 的工作基础上实现了电磁散射跟踪算法。图 5 是本算法的流程图:

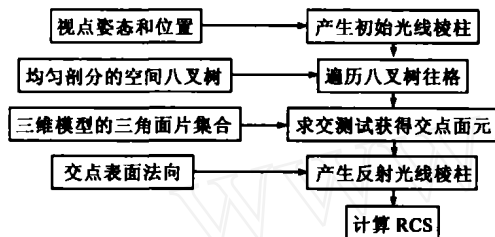


图 5 RCS 的光线跟踪流程图

算法一共分为五个核心部分,其中除了产生初始光线所对应的空间棱柱这一步是由 CPU 在预处理时完成以外,其余都设计成片段程序(fragment programs)由 GPU 执行。在本算法中,求交采用 Badouel D 提出的重心坐标法,遍历场景采用 Proximity Clouds 算法<sup>[17]</sup>。如果本算法控制跟踪深度为 1(不进行后续跟踪),则退化为 GRECO 算法。

光线跟踪算法中光线在整个场景中的遍历过程对性能有重要影响。为了加速这一过程,常采用层次包围盒、BSP 树、自适应八叉树、KD 树、均匀网格剖分等数据结构来存储场景数据<sup>[18,19]</sup>,实现加速算法。本文采用了均匀网格剖分技术来实现光线在场景中的快速遍历。采用均匀网格剖分主要有以下几个原因:首先是因为均匀网格剖分算法对于硬件实现而言相对简单,而且访问网格数据结构所需时间是常量,容易实现大规模的并行计算;其次在遍历均匀网格的时候所需要访问的数据量很少,而且遍历的时间复杂度是线性的;此外采用均匀网格剖分的编码易于优化以便于在硬件上更加高效地执行。

### 3 算例和效率

我们在已有的 GRECO 软件包的基础上,对原有的 GRECO 和基于 GPU 的 GRECO 的计算效率进行了比较。我们计算了 2.2 中提到的巡航导弹缩比模型(1/8)在 X

波段的散射数据,计算窗口为  $1024 \times 1024$ ,频率为 10GHz,总转角取  $360^\circ$ ,角度间隔  $0.25^\circ$ ,这就需要计算 1441 次电磁散射过程。计算平台中 CPU 为 Intel Pentium 4,时钟频率为 2.8GHz,内存容量 1GBytes,图形卡为 Nvidia GeForce 6600,具有 8 条并行处理管线,显存容量为 128MBytes。在计算过程中原 GRECO 共用了 390s,利用 GPU 加速后,计算时间 19s,效率提高了大约 20 多倍。下图为加速后的计算结果和紧缩场测量结果的对比。(其中测量数据和仿真数据均未经过任何平滑处理)。可以看到,两者的结果是比较吻合的。

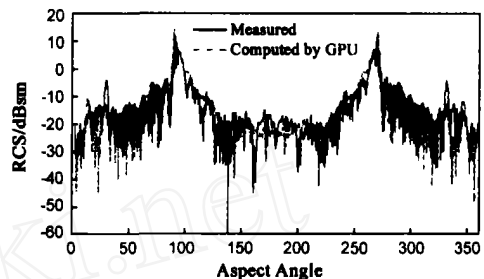


图 6 计算结果和测试结果的对比

为了检验目标间的多次散射计算,我们计算了由两个  $1\text{m} \times 1\text{m}$  的正方形金属板构成的直二面角散射体在 1GHz 下的散射结果,算法中追踪深度为 2,与文献 [7] 的结果作了比较,结果非常吻合,我们总共计算了方位角为  $-60^\circ \sim 60^\circ$  范围内的散射结果,共计耗时约 100 秒钟,结果如图 7 所示。

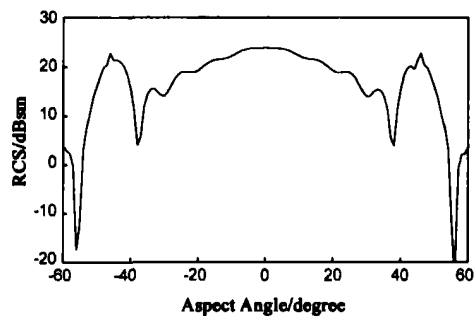


图 7 二面角的计算结果

多次散射的计算中,由于射线追踪算法本身的复杂性,计算速度比单纯的 GRECO 要慢很多,但是已经可以满足工程上的需要了。

我们进一步利用此加速算法仿真了一些目标的宽带角散射数据,并获得了目标的一维距离像和 ISAR 转台成像结果,与预期的结果是吻合的,在此不再赘述。

### 4 结论以及展望

我们利用计算机图形加速卡的可编程管线,成功地实现了复杂目标电磁散射的计算,并大大提高了计算效率,可以大规模获得目标宽带宽角的散射特性,更

快速的建立目标电磁散射特性的数据库,这对于目标识别等研究具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] Juan M Rius, Miguel Ferrando, Luis Jofre. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1993, 41(9): 1308 - 1318.
- [2] 吴恩华. 图形处理器用于通用计算的技术、现状及其挑战[J]. 软件学报, 2004, 15(10): 1493 - 1504.  
WU E H. State of the art and future challenge on general purpose computation by graphics processing unit[J]. Journal of Software, 2004, 15(10): 1493 - 1504. (in Chinese)
- [3] Sean E Krakowsky, Laurence E Turner, Michal M Okoniewski. Graphics processor unit (GPU) acceleration of finite-difference time-domain (FDTD) algorithm[A]. Proceedings of IEEE IS-CAS, 2004[C]. Vancouver, Canada: IEEE Circuits and Systems Society, 2004. 265 - 268.
- [4] 杨正龙. 雷达目标建模、检测和识别[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [5] 杨正龙, 方大纲, 刘铁军. 复杂目标电磁散射计算软件的改进[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(4): 86 - 89.  
YANG Zhenglong, FAN GDagang, LIU Tiejun. Modification of software for computing EM scattering of complex targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(4): 86 - 89. (in Chinese)
- [6] 杨正龙, 金林, 倪晋麟, 方大纲. 复杂目标双站 RCS 的图形电磁计算[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 1033 - 1035.  
YANG Zhenglong, JIN Lin, NI Jingling, FANG Dagang. Bistatic RCS calculation of complex target by GRECO[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 1033 - 1035. (in Chinese)
- [7] E F. 克拉特, 等. 雷达散射截面-预估、测量和缩减(第一版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
- [8] 黄培康, 林桂森, 樊正芳, 等. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993. 19 - 43.
- [9] Richard S Wright, Jr. Benjamin Lipchak. OpenGL 超级宝典(第三版)[M]. 徐波, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2005. 644 - 657.
- [10] Randima Fernando. GPU 精粹-实时图形编程的技术、技巧和技艺[M]. 姚勇, 王小琴, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 422 - 433.
- [11] Jinwook Kim. GPGPU Reduction Example[EB/OL]. <http://web.imrc.kist.re.kr/~jwkim/GLSL/reduction.zip>, 2005.
- [12] 秦德华, 王宝发, 刘铁军. Greco 中棱边检测方法及其绕射场计算的改进[J]. 电子学报, 2003, 31(8): 1160 - 1163.  
QIN Dehua, WANG Baofa, LIU Tiejun. Improvements of edges detecting and diffraction field computing in GRECO[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(8): 1160 - 1163. (in Chinese)
- [13] H Ling, R Bhalla. Three-dimensional scattering center extraction using the shooting and bouncing ray technique[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1996, 44(11): 1445 - 1453.
- [14] H Ling, R Bhalla, J Moore. A global scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1997, 45(12): 1850 - 1856.
- [15] D Andersh, J Moore, et al. Xpatch 4: the next generation in high frequency electromagnetic modeling and simulation software[A]. The Record of the IEEE 2000 International Radar Conference[C]. Alexandria Virginia: IEEE, 2000. 844 - 849.
- [16] Timothy J Purcell, Ian Buck, William R Mark, Pat Hanrahan. Ray tracing on programmable graphics hardware[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 703 - 712.
- [17] Daniel Cohen, Zvi Sheffer. Proximity clouds-an acceleration technique for 3D grid traversal[J]. The Visual Computer, 1994, 11(1): 27 - 38.
- [18] Donald Hearn, M. Pauline Baker. 计算机图形学(第二版)[M]. 蔡士杰, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 413 - 423.
- [19] David F Rogers. 计算机图形学的算法基础[M]. 石教英, 彭群生, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002. 302 - 308.

#### 作者简介:



杨正龙 男, 1976 年 10 月出生于甘肃省临洮县, 博士, 2002 年 6 月毕业于南京理工大学, 现于南京电子技术研究所博士后工作站工作, 在国内杂志以及国际会议上发表论文数篇, 参与了国防科工委、国家自然科学基金等多个项目的研究工作. 主要研究方向为雷达成像、电磁散射计算等. E-mail: dragonyz1976@sohu.com



金林 男, 1965 年 10 月出生于江西省永修, 博士, 研究员, 1989 年 2 月研究生毕业于北京航空航天大学电子工程系. 目前从事雷达微波天线的工作. 作为主要参加者研制成功的《机载预警超低副瓣波导裂缝天线》1994 年获电子部科技进步特等奖、1995 年获国家科技进步二等奖. 发表论文十余篇. E-mail: sjlx@jlonline.com



李蔚清 男, 1974 年生, 博士, 南京理工大学计算机科学与技术学院讲师. 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、系统仿真, 承担多项省部级科研项目, 获得省部级科技奖励 2 项.